

Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 101| Ausgabe 1

Agrarwissenschaft

Forschung

Praxis

Herausgegeben vom Bundesministerium
für Ernährung und Landwirtschaft

http://buel.bmel.de

ISSN 2196-5099



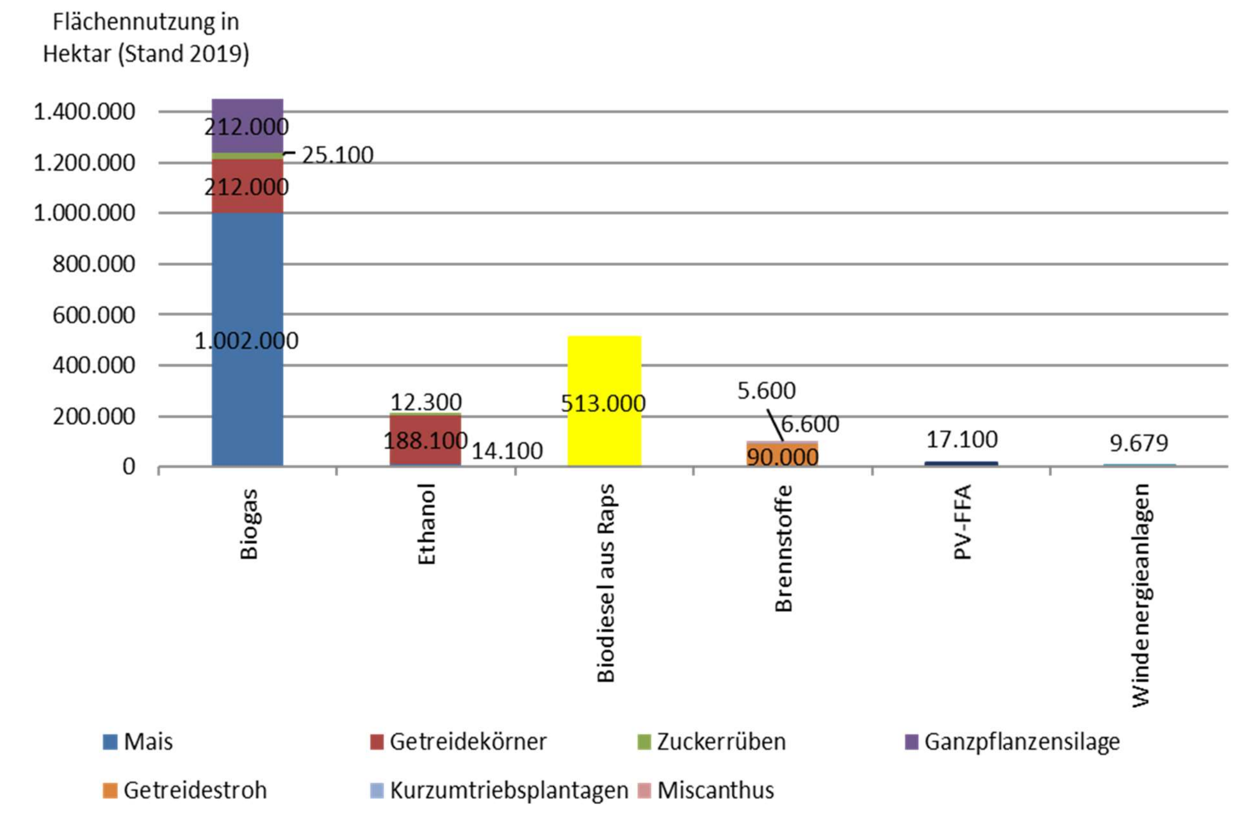
Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr

Von Jonas Böhm

1 Einleitung

Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist nicht erst seit Beginn der Energiepreiskreise von 2021/2022 ein politisch und gesellschaftlich stark diskutiertes Thema. Bereits seit dem Jahr 2000 wird mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) der Ausbau der erneuerbaren Energien politisch gesteuert und gefördert (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020). Das EEG bezieht sich primär auf den Stromsektor. Im Verkehrssektor ist vor allem das Biokraftstoffquotengesetz (BioKraftQuG) und im Wärmesektor das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) relevant (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2022b).

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, werden viele der in Deutschland geförderten erneuerbaren Energien auf landwirtschaftlichen Flächen erzeugt. Die größten Anteile an der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) nehmen bisher der Energiepflanzenanbau für die Biogaserzeugung (8,7 %) und der Rapsanbau für die Biodieselherstellung (3,1 %) ein. Photovoltaik-Freiflächenanlagen beanspruchen hingegen aktuell nur 0,1 % der LF (vgl. Abbildung 1).



Anmerkung: Angaben zu Windeneregieanlagen (WEA) sind Hochrechnungen der gesamten versiegelten Fläche in Deutschland. Quellen: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2022a), (Böhm, de Witte und Michaud, 2022).

Abb. 1: Landwirtschaftliche Flächennutzung für erneuerbare Energien (Stand 2019).

Vor dem Hintergrund immer knapper werdender LF stellt sich die Frage, ob die bisherige Ausrichtung ihrer Nutzung zielführend ist oder ob die benötigte Energie nicht mit anderen Technologien und einem geringeren Flächenbedarf erzeugt werden kann (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2020b). Zur Beantwortung dieser Frage werden in diesem Beitrag die flächenbezogenen Energieerträge für verschiedene Arten der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien miteinander verglichen.

Hierfür werden in Kapitel 2 zunächst die berücksichtigten Technologien, Datengrundlagen und Berechnungsmethoden beschrieben. Da einige Technologien neben der Energie auch Koppelprodukte erzeugen, werden hierfür ebenfalls die Bewertungsmöglichkeiten von Koppelprodukten berücksichtigt. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse des Vergleichs im Hinblick auf Flächenenergieerträge im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor dargestellt. In Kapitel 4 erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse.

2 Material und Methoden

Als biogene erneuerbare Energien werden unter anderem verschiedene Optionen zur Erzeugung und Verwertung von Biogas sowie Ethanol und die Brennstoffproduktion betrachtet. Als technische erneuerbare Energien werden Windenergieanlagen (WEA) und verschiedene Photovoltaik-Konzepte bewertet.

2.1 Energieerträge biogener erneuerbarer Energiequellen

In Tabelle 1 sind die berücksichtigten Mittelwerte und Spannweiten der Frischmasseerträge (FM-Erträge) sowie die unterstellten Lagerungsverluste der laut Abbildung 1 wichtigsten Rohstoffe der Bioenergieerzeugung dargestellt. Hierzu gehören neben der Erzeugung von Biogas auch die Ethanolherstellung, die Biomasseerzeugung für die Brennstoffproduktion sowie die Erzeugung von Biodiesel aus Rapsöl.

Tabelle 1:
Datengrundlage biogene erneuerbare Energien.

	Frischmasseertrag			Lagerverluste
	Min	**⌀ 2013-2018**	**Max**	
		t FM/ha/Jahr		%
Raps	2	3,71	5	-
Silomais	35	42,24[2]	65	12
Körnermais	8	9,481	14	4,5
Zuckerrübe	45	73,2[2]	90	15
Getreide GPS	25	37,5*	50	12
Getreidekörner**	3	7,091	12	1,4
Stroh von Getreide**	5,2	7,8*	10,4	-
KUP	4	20	36	20
Miscanthus	12,5	23,75	35	2/3,5/5***

Anmerkung: *Mittelwert; **Weizen/Gerste/Roggen/Triticale; ***Min/Mittel/Max. Quellen: Belau (2012); Quellen: [1]Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2020a), [2]Deutsches Biomasseforschungszentrum (2022).

Die energetische Verwertung der Energiepflanzen erfolgt sehr unterschiedlich. So werden als nachwachsende Rohstoffe für die Biogaserzeugung in Deutschland üblicherweise Silomais, Zuckerrüben, Getreide-GPS oder Getreidekörner eingesetzt. Die Biogasausbeute unterscheidet sich je nach Substrat und liegt zwischen 145 m^3/t FM[1] und 616 m^3/t FM (siehe Anhang 1). Die Methanausbeute liegt dabei bei ca. 52 % der Energie von Biogas (Belau, 2012). Zudem kann das Methan aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist werden. Hierfür wird ein mittlerer Wirkungsgrad von 92,5 % unterstellt (Baum et al., 2008). Weitere Annahmen für die Biogaserzeugung finden sich in Anhang 2.

Die thermische Verwertung von auf landwirtschaftlichen Flächen erzeugter Biomasse erfolgt vor allem, indem Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) oder Miscanthus verbrannt werden. Des Weiteren werden Getreidekörner oder Getreidestroh als Brennstoff genutzt. Für die Verbrennung ist der Trockenmasseertrag (TM-Ertrag) der Kulturen maßgeblich. Je nach Kultur muss zudem von einem unterschiedlichen Heizwert ausgegangen werden (siehe Anhang 4).

Für die Ethanolproduktion werden üblicherweise Körnermais, Zuckerrüben oder Getreidekörner verwendet. Der Ethanolertrag schwankt je nach Input zwischen 107 l/t FM und 416 l/t FM (siehe Anhang 3). Es wird mit einem Energiegehalt bei Bioethanol von 5,85 kWh/l kalkuliert (Belau, 2012).

Raps kann auch auf verschiedene Weise energetisch genutzt werden. Dazu werden die Rapskörner zur Gewinnung von Rapsöl kalt oder warm gepresst. Um die Ölausbeute weiter zu erhöhen, können auch Extraktionsmittel verwendet werden. Das Rapsöl wird entweder direkt genutzt oder weiter zu Rapsmethylester (RME bzw. Biodiesel) veredelt. Es wird bei der Rapsölerzeugung von einem Kaltpressvorgang mit einer Ölausbeute von 340 l/t FM ausgegangen (Braune et al., 11. Mai 2016). Die weiteren Annahmen für die energetische Nutzung von Raps sind in Anhang 5 einzusehen.

2.2 Bewertung von Koppelprodukten

Vor allem bei der Produktion von Biokraftstoffen fallen neben den Produkten zur energetischen Nutzung auch Koppelprodukte an. So entsteht beispielsweise beim Pressvorgang von Raps neben Rapsöl auch Rapskuchen oder Rapsextraktionsschrot. Bei der Ethanolherstellung aus Getreidekörnern entsteht neben Ethanol auch DDGS (Dried Distillers Grain with Solubles – Trockenschlempe). Die genannten Koppelprodukte oder Nebenprodukte werden häufig für die Tierernährung und dort zumeist als Eiweißfuttermittel genutzt. Um diese Nutzung bei der Bewertung der

[1] FM = Frischmasse, gewogener Ertrag, welcher sich aus der Trockenmassegehalt (TM) und dem dem natürlichen Wassergehalt zusammensetzt.

Flächenenergieerträge mit zu berücksichtigen, existieren verschiedene Allokations- oder Substitutionsverfahren (Brankatschk und Finkbeiner, 2014, Dressler et al., 2016, Fehrenbach und Bürck, 2022, Majer et al., 2015, Majer und Oehmichen, 2010).

In der EU-Richtline 2009/28/EG (Renewabale Energy Directive) werden die Koppelprodukte für Biokraftstoffe über die Allokation nach dem Heizwert berücksichtigt (vgl. DIN EN ISO 14044). Eine Allokation kann grundsätzlich jedoch auch nach anderen Kriterien, wie beispielsweise der Masse, dem ökonomischen Wert, den Kalorien oder der Getreideeinheit durchgeführt werden (Dressler et al., 2016, Brankatschk und Finkbeiner, 2014).

Bei der Substitutionsmethode wird versucht, über Gutschriften die tatsächliche Nutzung der Nebenprodukte widerzuspiegeln. Wird beispielsweise durch das Koppelprodukt das Eiweißfuttermittel Soja substituiert, erfolgt eine Gutschrift in Höhe des Energieertrages der dann nicht mehr benötigten (substituierten) Sojafläche. Somit können theoretisch die tatsächlichen Substitutionseffekte berücksichtigt werden. Da diese jedoch in der Regel nicht bekannt sind, müssen hierfür Annahmen getroffen werden, die das Ergebnis stark beeinflussen können. Beispielsweise stellt sich die Frage, welches Eiweißfuttermittel substituiert wird und welches Ertragsniveau für die substituierten Kulturen zu unterstellen ist.

Je nach Berechnungsmethode kann es somit zu deutlichen Schwankungen der Gutschriften kommen. Wie in Kapitel 3 noch verdeutlicht wird, sind die Unterschiede zwischen den analysierten erneuerbaren Energieträgern jedoch so groß, dass das Vorgehen zur Berücksichtigung der Koppelprodukte sich nur marginal auf die Ergebnisse auswirkt. Aufgrund der einfachen Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit daher in Anlehnung an die EU-Richtlinie 2009/28/EG das Allokationsverfahren nach Heizwert angewendet. Dazu werden die im Anhang 6 und Anhang 7 dargestellten Berechnungsansätze verwendet. Es wird für Rapsöl ein Allokationsfaktor von 58 % und für die Ethanolherstellung aus Getreidekörnern von 60 % angesetzt (Fehrenbach und Bürck, 2022). Somit wird der Biokraftstoffertrag auf 58 % bzw. 60 % der tatsächlich benötigten Fläche umgelegt.

2.3 Energieerträge von Photovoltaik-Freiflächenanlagen

Neben dem Anbau von Biomasse existieren jedoch weitere Optionen, um Energie auf landwirtschaftlichen Flächen zu erzeugen. Hierzu zählt vor allem die Stromerzeugung in Pholtovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen). Daher werden nachfolgend die Annahmen für die Kalkulation flächenbezogener Energieerträge aus PV-Freiflächenanlagen und Agri-Photovoltaik-Anlagen (Agri-PV-Anlagen) erläutert.

2.3.1 Annahmen und Berechnung Photovoltaik-Freiflächenanlagen

Die Flächenenergieerträge von PV-Freiflächenanlagen werden anhand von vier Standorten und fünf Anlagengrößen kalkuliert. Über die vier Standorte sollen die Unterschiede der Stromerzeugung durch die Globalstrahlung im Norden, Osten, Süden und Westen Deutschlands abgebildet werden, welche zwischen 980 und 1150 kWh/kWp[2]/Jahr liegen. Der Stromertrag der Fläche wird aber auch von der Anlagengröße beeinflusst. In Anlehnung an das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2021 werden Anlagen der Größen 750 kWp, 2 MWp, 5 MWp und 20 MWp für Anlagen innerhalb der EEG-Förderung und eine 100 MWp Anlage außerhalb der EEG-Fördergrenzen betrachtet. Je nach Anlagengröße schwankt dabei die spezifische Flächeninanspruchnahme, also die installierte Leistung der Fläche, da bei großen Anlagen weniger Randeffekte auftreten und eine platzsparende Aufständerung möglich ist. Demnach schwankt die spezifische Flächeninanspruchnahme zwischen 2 ha/MWp (Megawatt-Peak) bei kleinen 750 kWp (Kilowatt-Peak) Anlagen und 0,9 ha/MWp bei sehr großen 100 MWp Anlagen.
Der Flächenstromertrag ergibt sich im Mittel über die Nutzungsdauer von 25 Jahren, da sich der Stromertrag aufgrund der Moduldegradation (Modulalterung) über die Jahre hinweg verringert. Um diese zu berücksichtigen, wird eine Leistungsdegradation der Anlagen von 0,25 %/Jahr angesetzt. Um die aktuellen Nachteile der fluktuierenden Stromerzeugung zu berücksichtigen, werden zudem die aktuell üblichen Abregelungsverluste von 1 % einkalkuliert (Böhm, de Witte und Plaas, 2022).

2.3.2 Annahmen und Berechnung Agri-Photovoltaik

Eine besondere Art der PV-Freiflächenanlagen ist die Agri-PV, die eine gleichzeitige Nutzung der Fläche für die landwirtschaftliche Produktion sowie die solare Stromerzeugung ermöglicht. Die Agri-PV ist nach DinSpec 91434 definiert und von PV-Freiflächenanlagen abgegrenzt (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Aktuell befinden sich zahlreiche unterschiedliche Konzepte in der Diskussion. Nachfolgend werden zwei verschiedene Konzepte betrachtet: ein vertikales Agri-PV-Konzept sowie ein hoch aufgeständertes (horizontales) Konzept. In Tabelle 2 sind die flächenbezogenen Annahmen der genannten Systeme gegenübergestellt.

[2] kWp = Die Einheit Kilowatt-Peak, gibt die Leistung in Kilowatt (kW) einer Photovoltaikanlage an, welche unter genormten Bedingungen erreicht wird.

Tabelle 2:
Annahmen zum Flächenbedarf und Stromertrag der analysierten Agri-PV-Konzepte.

	Spezifische Flächen-inanspruchnahme [ha/MWp]	Verbleibende landwirtschaftlich nutzbare Fläche	Stromertrag im Vergleich zur installierten PV-FFA Leistung
Horizontales Konzept	1,93	92 %	108 %
Vertikales Konzept	3,34	90 %	110 %

Quellen: (Trommsdorff, 2018, Schindele et al., 2020, Next2Sun, 2020).

Agri-PV horizontal

Für das hoch aufgeständerte horizontale Konzept wird die Forschungsanlage in Heggelbach als Beispiel betrachtet (Schindele et al., 2020, Trommsdorff, 2018). Dabei wurden massive Aufständerungen verwendet und die Module in einer Höhe von fünf Metern montiert sowie Richtung Süden ausgerichtet. Die installierte Leistung auf der Fläche entspricht ungefähr der Hälfte von einer PV-Freiflächenanlage (PV-FFA). Da bifaziale Module verbaut werden, welche mit der Vorder- und Rückseite Strom erzeugen können, ist von höheren Stromerträgen je installierter Leistung auszugehen. Die versiegelte Fläche liegt unter 1 %. Da die landwirtschaftliche Produktion üblicherweise in Streifen erfolgt, gehen aufgrund der Aufständerung ca. 8 % der Fläche für die landwirtschaftliche Nutzung verloren, sodass weiterhin 92 % der Fläche landwirtschaftlich genutzt werden können. Zu beachten ist, dass durch die Verschattung der Module die landwirtschaftlichen Erträge beeinflusst werden. Für die meisten Ackerbaukulturen in Deutschland ist in durchschnittlichen Jahren ein negativer Ertragseffekt zu erwarten (Feuerbacher et al., 2021, Laub et al., 2021). Die Verschattung kann sich bei Extremwetterereignissen aber auch positiv auswirken, indem sie vor extremer Hitze schützt und die Verdunstung verringert. (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2022). Mögliche Ertragseffekte werden im Rahmen dieser Analyse nicht berücksichtigt.

Agri-PV vertikal

Bei dem vertikalen Konzept werden bifaziale Module wie ein Zaun senkrecht aufgeständert (Next2Sun, 2020). Zwischen den Modulreihen ist weiterhin eine landwirtschaftliche Nutzung möglich. Die Reihenabstände können bei der Installation an die Arbeitsbreiten der Landwirtschaft angepasst werden. Üblich ist ein Abstand der Modulreihen von 10 Metern. Aktuell gibt es schon mehrere große Anlagen auf Grünland. Für Ackerland wurde eine Forschungsanlage im Jahr 2022 fertiggestellt.

Für die Agri-PV erfolgt keine Anrechnung/Aufsummierung einer möglichen Nutzung der verbleibenden landwirtschaftlichen Fläche für biogene erneuerbare Energien. Zu beachten ist, dass sich großflächig in Deutschland bisher keine Agri-PV-Konzepte durchgesetzt haben, da diese mit höheren Stromgestehungskosten und einer geringeren Wertschöpfung auf der Fläche (Grundrente) im Vergleich zu PV-Freiflächenanlagen verbunden sind (Böhm, 2022).

Da ein Großteil der Anlagenfläche bei Agri-PV weiterhin landwirtschaftlich genutzt wird, ist hinsichtlich des flächenbezogenen Energieertrages entscheidend, auf welche Fläche der Energieertrag bezogen wird. Hier sind drei Bezugsgrößen zu unterscheiden:

(1) Die **Anlagenfläche**: ist die Fläche, welche aus Versicherungsgründen meistens umzäunt ist. Aktuell muss die gesamte Anlagenfläche im Bebauungsplan für die Photovoltaiknutzung zugelassen sein. Sie beschreibt somit die maximale visuell beeinflusste Fläche im Landschaftsbild. Die Anlagenfläche ist für eine gleiche PV-Leistung bei Agri-PV-Konzepten in der Regel deutlich größer als bei PV-FFA.

(2) Der **Verlust an landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF)** für eine intensive Bewirtschaftung unterscheidet sich zwischen PV-FFA und Agri-PV stark. Bei PV-FFA kann die gesamte Anlagenfläche nicht mehr intensiv bewirtschaftet werden. Bei Agri-PV kann hingegen unter oder zwischen den Modulaufständerungen weiterhin Landwirtschaft betrieben werden. Der Verlust an Fläche für die landwirtschaftliche Nutzung ist dementsprechend bei Agri-PV erheblich geringer als bei PV-FFA.

(3) Die **tatsächlich versiegelte Fläche** unterscheidet sich zwischen Agri-PV und PV-FFA nicht wesentlich, dabei ist die Versiegelung der Fläche mit 0,5-1 % der Anlagenfläche sehr gering (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2018). Allerdings werden nach aktueller Gesetzgebung die gesamten Anlagenflächen von PV-FFA und Agri-PV-Anlagen als Industrieflächen deklariert und mit einer 100%igen Versiegelung gleichgesetzt.

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Energieerträge je Hektar Anlagenfläche sowie die Energieerträge je Hektar verlorene landwirtschaftliche Nutzfläche betrachtet.

2.4 Energieerträge von Windenergieanlagen

Eine weitere Option zur Stromerzeugung auf landwirtschaftlichen Flächen sind Windenergieanlagen (WEA). Um die Spannweite möglicher Flächenenergieerträge von WEA abzubilden, werden auf Basis einer Literaturrecherche und Experteninterviews ein Niedrig-, ein Mittel- und Hochertragsszenario erstellt (Barth, 2022, Teßmer, 2022).

Der Stromertrag hängt vor allem von der Anlagengröße ab. Um die aktuelle Anlagenleistung zu identifizieren wurde auf das Marktstammdatenregister zurückgegriffen (Stand 11.08.2022). In diesem Register müssen alle stromerzeugenden Anlagen in Deutschland registriert werden. Der Fokus lag dabei auf neuen Anlagen, die ab 2018 auf dem Festland errichtet wurden. Danach liegt die Spanne aktueller Anlagengrößen zwischen 2,5 MW/Anlage (niedrig) mit 110 m Rotordurchmesser, 3,5 MW/Anlage (mittel) mit 125 m Rotordurchmesser und 4,5 MW/Anlage (hoch) mit 149 m Rotordurchmesser (Bundesnetzagentur, 2022).
Weiterhin beeinflusst die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit am Standort den Stromertrag. Für das Niedrigertragsszenario werden nach Kost et al. (2021) eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5,5 m/s und 1.800 Volllaststunden/Jahr unterstellt. Für das Mittelertragsszenario werden von 6,5 m/s und 2.500 Volllaststunden/Jahr und für das Hochertragsszenario von 7,8 m/s bzw. 3.200 Volllaststunden/Jahr ausgegangen.
Für die Bewertung des Energieertrages ist auch hier die berücksichtigte Fläche relevant. Dabei kann zwischen den folgenden zwei Flächenbezügen unterschieden werden:

Versiegelte Fläche

Die durch Fundamente, Kranstellflächen und Zuwegung versiegelten Agrarflächen entsprechen dem Verlust an landwirtschaftlicher Nutzfläche. Der Flächenbedarf für das Fundament kann mit der Anlagengröße korrelieren. Dieser Effekt bleibt folgend unberücksichtigt. Je nach realisiertem Projekt unterschiedet sich aber die versiegelte Fläche zum Teil stark, da andere landschaftliche Rahmenbedingungen wie z.B. Zuwegungen vorhanden sind. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass beim Niedrigertragsszenario 0,6 ha landwirtschaftliche Nutzfläche je Anlage verloren gehen, beim Mittelertragsszenario 0,4 ha/Anlage und beim Hochertragsszenario 0,24 ha/Anlage (Seeger et al., 2023, v.d.Decken, 1. März 2023, Barth, 2022, ABO Wind, 2021, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2021, Bundesverband Boden, 2021, Quentin und Tucci, 2021, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, 2016, Bundesverband WindEnergie, 2015, Reimann, 2013).

Windflächenbedarf

WEA werden meistens in Windparks mit mehreren dieser errichtet. Dabei beeinflussen sich die Anlagen gegenseitig durch z. B. Turbulenzen, sodass ein Mindestabstand zwischen den Anlagen notwendig ist. Daraus ergibt sich für die Errichtung eines Windparks ein Windflächenbedarf. Um den Windflächenbedarf zu berechnen, wird auf den Abstand als Vielfaches der Rotordurchmesser

zurückgegriffen. Der Abstand variiert in der Realität stark zwischen einzelnen Projekten. Für die Kalkulationen wird im Niedrigertragsszenario von einem fünffachen Rotorabstand, im Mittelertragsszenario von einem vierfachen und beim Hochertragsszenario von einem dreifachen Rotorabstand ausgegangen (Amelung et al., 2014, Neddermann und Müller, 2015, Barth, 2022, Teßmer, 2022). In Verbindung mit den genannten Rotordurchmessern ergibt sich ein Windflächenbedarf von 23,8 ha/Anlage (niedrig), 19,6 ha/Anlage (mittel) und 15,7 ha/Anlage (hoch). Die Berechnung der Stromerträge je Hektar Windfläche erfolgt über folgende Formel:

$$S = \frac{L * h}{sF}$$

S = Stromertrag der Fläche [MWh/ha/Jahr]

L = Anlagenleistung [MW/Anlage]

H = Volllaststunden pro Jahr [h/Jahr]

sF = spezifische Flächeninanspruchnahme [ha/Anlage]

2.5 Annahmen hinsichtlich der Energieverwertung

In den vorherigen Kapiteln wurden die verschiedenen Energieerzeugungsmöglichkeiten dargestellt. Die Energie kann aber sehr unterschiedlich genutzt werden, wobei unterschiedliche Umwandlungseffizienzen relevant sind. So kann Strom genutzt, Wärme erzeugt oder eine Fahrleistung im Verkehr erzielt werden. Im Folgenden werden die Annahmen für die Umwandlung in die verschiedenen Energienutzungsformen erläutert.

Verstromung

PV-FFA und WEA erzeugen Strom, welcher direkt genutzt werden kann. Bei Biogas wird hingegen Methan als Energiemedium hergestellt. Die Verstromung von Biogas kann mithilfe von Gasmotoren in Blockheizkraftwerken (BHKW) erfolgen. Für diese Stromproduktion aus Biogas werden Wirkungsgrade zwischen 28 % und 47 % angenommen. Im Mittel wird von einem Wirkungsgrad von 38 % ausgegangen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2020). Zusätzlich fällt bei der Biogasverstromung Abwärme an, welche auch zur Stromgewinnung genutzt werden kann. Die Abwärme kann theoretisch mit einem OCR-Verfahren in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Die Wirkungsgrade sind dabei mit 11 % im Mittel und einer Spannweite von 6 bis 16 % deutlich geringer (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2020). Häufig werden die Vorteile der Grundlaststromerzeugung und flexiblen Erzeugung bei Biogas angeführt. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, kann für PV-Anlagen und WEA eine

Speicherung angesetzt werden. Dazu wird ein Großbatteriespeicher mit einem Wirkungsgrad von 84 % angenommen (Deutscher Bundestag, 2019).

Wärmeerzeugung

Wärme kann über verschiedene Möglichkeiten bereitgestellt werden. Es kann einerseits die Abwärme eines Biogas-BHKW genutzt werden. Andererseits kann auch die direkte thermische Verbrennung verwendet werden, wie z. B. die Verbrennung von Hackschnitzeln oder Stroh. Die Wärme kann aber auch direkt beim Nutzer erzeugt werden. Das aufbereitete und ins Erdgasnetz eingespeiste Methan aus Biogasanlagen kann in herkömmlichen Gas-Brennwertthermen thermisch genutzt werden. Der erzeugte Strom wird direkt über Wärmepumpen in Wärme umgewandelt. Die Schwankungsbreite der Wirkungsgrade der berücksichtigten Technologien zur Wärmeerzeugung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3:
Annahmen für die Wirkungsgrade bei der Wärmeerzeugung.

Art	Mittelwert	Min.	Max.	Einheit
Biogas-BHKW[1]	45%	34%	55%	% / kWh Methan
Verbrennung (Stroh, Holz-Hackschnitzel, Miscanthus, Getreidekörner)[2]	89%	89%	89%	% / kWh
Gas-Brennwerttherme[3]	93%	90%	96%	% / kWh
Wärmepumpen[4]	3,6	1,8	5	JAZ [$kWh_{therm.}$ / $kWh_{el.}$]

Anmerkung: Bei den Wärmepumpen werden sowohl Außenluft- als auch Erdreich-Wärmepumpen betrachtet.
Quellen: [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2020), [2]Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2013), [3]KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg (2022), [4]Günther et al. (2020).

Energienutzung für Mobilität

Für die Nutzung der erzeugten Energie im Verkehrssektor werden verschiedene Optionen auf Basis des Verbrauchs eines Mittelklassewagens miteinander verglichen. Für die vergleichende Bewertung wird daher als Zielwert die zu erzielende Fahrleistung je Hektar berechnet. Bei der Nutzung von Biogas wird davon ausgegangen, dass das Biogas verstromt und in einem Elektroauto genutzt wird. Als weitere Option wird die Aufbereitung zu Methan, Einspeisung in das Erdgasnetz und Verbrauch in einem Erdgasauto berücksichtigt. Ethanol wird in einem Ottomotor und Rapsöl/Biodiesel in einem

Dieselmotor eingesetzt. Die aus den unterschiedlichen Wirkungsgraden resultierenden Energieverbräuche der genannten Optionen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4:
Energieverbrauch eines Mittelklassewagens für unterschiedliche Energiequellen.

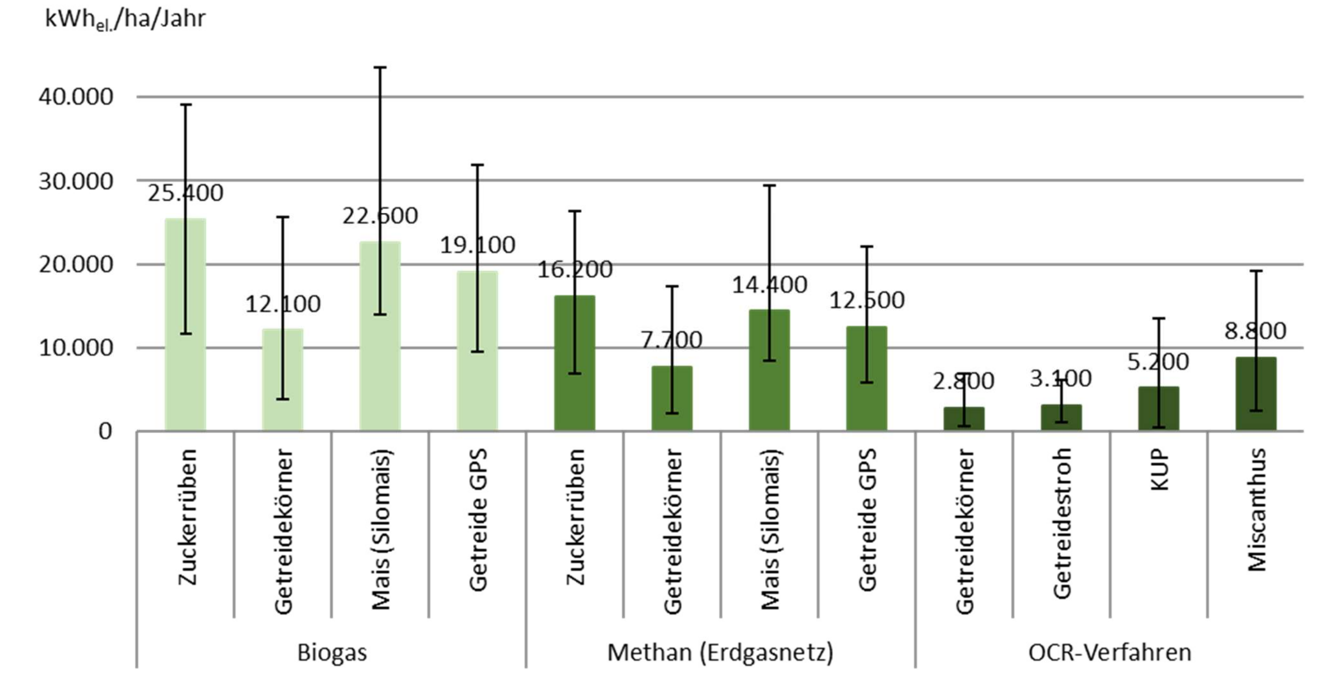
Verbrauch	Annahmen	kWh/km
Elektroauto	18,4 kWh/100 km	0,1840
Benzin	5,9 l/100 km	0,5322
Rapsöl	-	0,4704
Biodiesel	4,7 l/100 km	0,4426
Ethanol	-	0,5310
Methan	4,2 kg/100 km	0,5816

Anmerkung: Rapsöl-Dieseläquivalent von 0,96 l/Diesel pro l/Rapsöl; Bioethanol-Ottokraftstoffäquivalent von 0,65 l Benzin je Liter Bioethanol; Heizwert bei Ottokraftstoff von 9,02 kW/l; bei Biodiesel von 9,04 kWh/l und bei Rapsöl von 9,61 kWh/l.
Quellen: (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2019, Wietschel et al., 2019) und eigene Berechnungen nach Belau (2012) Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2020) und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2020).

3 Ergebnisse

3.1 Flächenbezogene Stromerträge

In Abbildung 2 werden die Flächenerträge der Stromproduktion von den biogenen erneuerbaren Energien miteinander verglichen. Silomais und Zuckerrüben ermöglichen mit verstromtem Biogas die höchsten Flächenenergieerträge. Über die Einspeisung ins Erdgasnetz und spätere Verstromung in einem BHKW bewirkt die Methanaufbereitung geringere Stromerträge als die direkte Nutzung des Biogases in BHKW's. Wie Eingangs erläutert kann mit dem OCR-Verfahren Wärme in Strom umgewandelt werden, diese OCR-Verfahren haben aufgrund der geringen Wirkungsgrade aber deutlich geringere Flächenstromerträge.



Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 2: Stromerträge je Hektar für biogene erneuerbare Energien.

Tabelle 5:
Jährliche Stromerträge je Hektar PV-Anlage

[kWh/ha/Jahr]		**Niedrigertrags-szenario**	**Durchschnittliches Ertragsszenario**	**Hochertrags-szenario**
Stromertrag je Anlagenfläche	PV-FFA	471.007	848.095	1.225.182
	Agri-PV vertical	186.519	338.808	485.172
	Agri-PV horizontal	316.811	575.481	824.087
Stromertrag je Verlust an Fläche für die Landwirtschaft	PV-FFA	471.007	848.095	1.225.182
	Agri-PV vertical	1.865.189	3.388.082	4.851.720
	Agri-PV horizontal	3.960.135	7.193.514	10.301.084

Quelle: Eigene Berechnungen nach Böhm, de Witte und Plaas (2022).

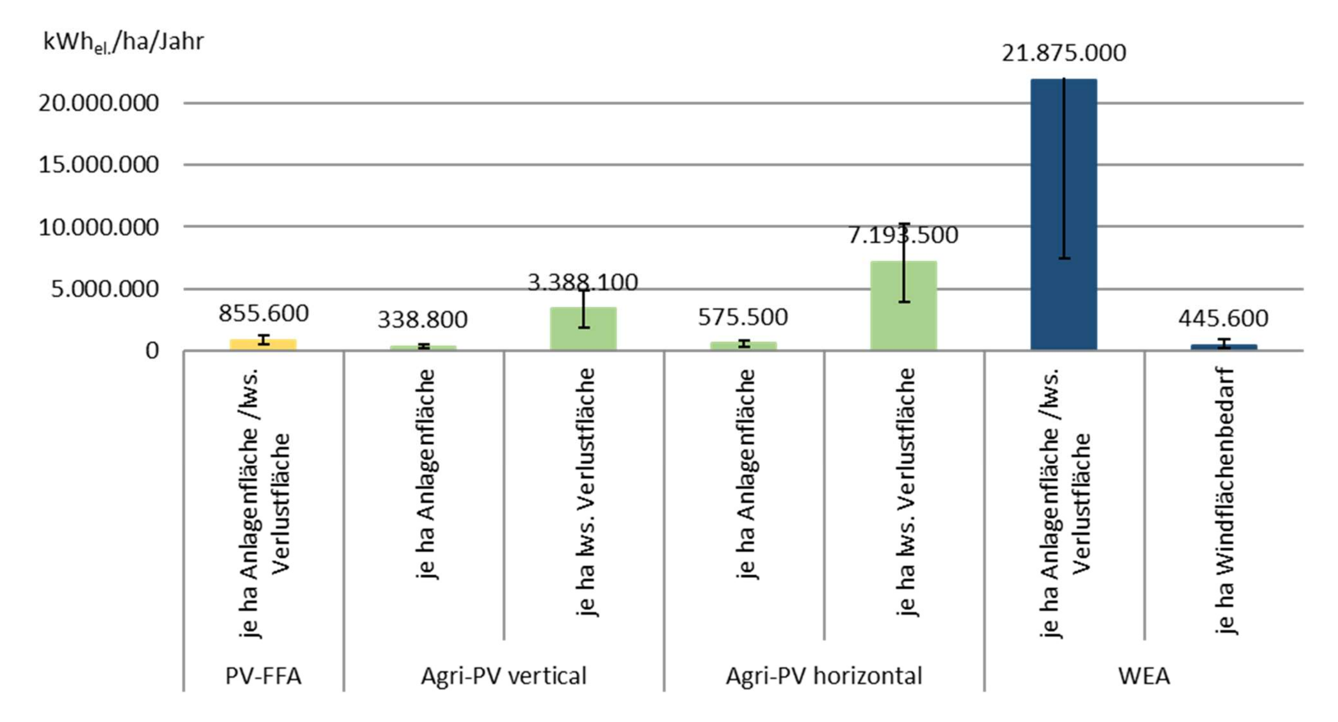
Die möglichen Flächenstromerträge von PV-FFA und den Agri-PV-Konzepten sind in Tabelle 5 dargestellt. Als durchschnittlicher Wert wird der Mittelwert über alle betrachteten Standorte und Anlagengrößen angenommen. Der angenommene Durchschnittswert einer PV-FFA ist sehr ähnlich dem Stromertrag einer 5 MWp PV-FFA-Anlage in Leipzig (Böhm, de Witte und Plaas, 2022). Unter Berücksichtigung gleicher Standortannahmen und Berechnungsmethoden wie für PV-Freiflächenanlagen ergeben sich bei beiden Agri-PV-Konzepten geringere Stromerträge je Hektar Anlagenfläche. Da ein Großteil der landwirtschaftlichen Fläche für die Produktion erhalten bleibt, sind die Stromerträge je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche deutlich höher als bei PV-FFA.

Bei den WEA ist ein sehr großer Schwankungsbereich der Stromerträge festzustellen (siehe Tabelle 6). Dabei ist entscheidend, ob die versiegelte Fläche oder der Windflächenbedarf (die maximale Bebauung im Windpark) betrachtet wird.

Tabelle 6:
Jährliche Stromerträge von WEA je Hektar versiegelte Fläche sowie je Hektar Windflächenbedarf.

	Niedrigertrags-szenario	Mittelertrags-szenario	Hochertrags-szenario	Einheit
Stromertrag der versiegelten Fläche	7.500	21.875	60.000	MWh/ha/Jahr
Stromertrag des Windflächenbedarfs	189	446	918	MWh/ha/Jahr
Stromertrag je Anlage	4.500	8.750	14.400	MWh/Anlage/Jahr

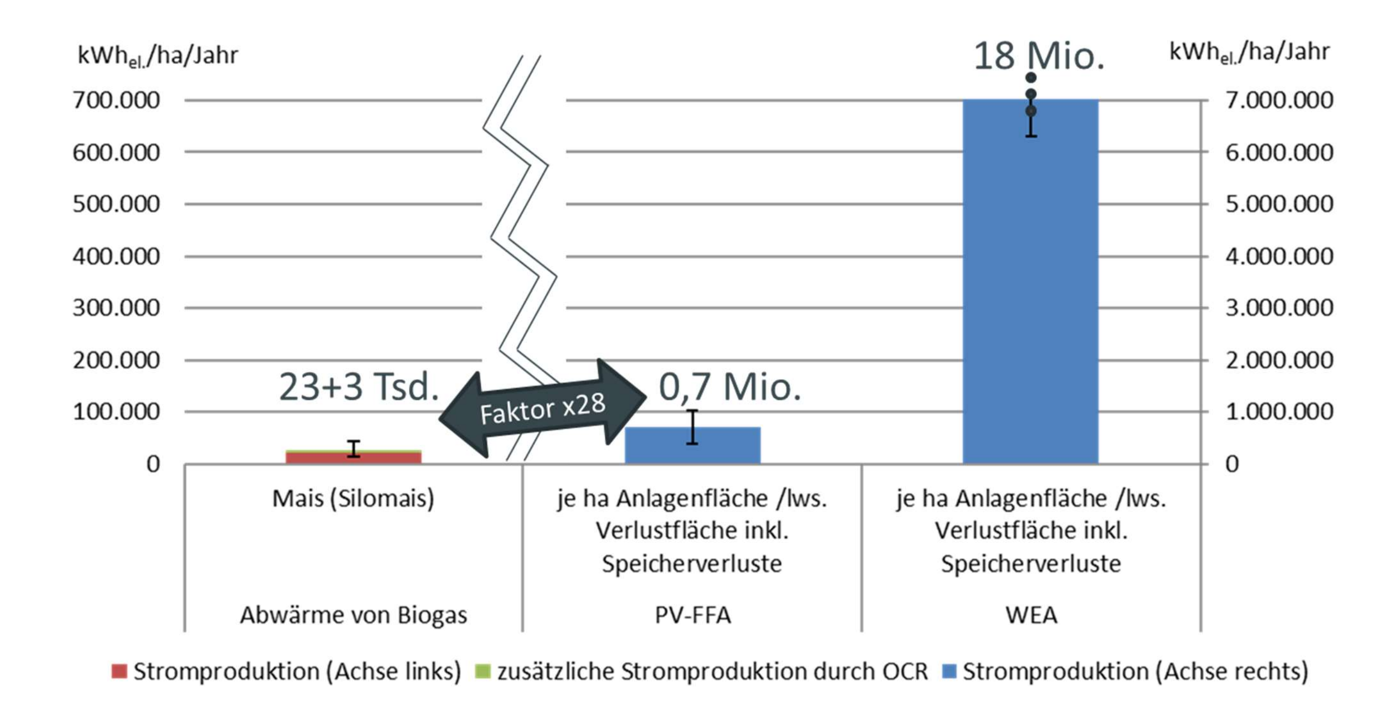
Quelle: Eigene Berechnungen



Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. PV-FFA = PV-Freiflächenanlagen, WEA = Windenergieanlagen. Der maximale Schwankungsbereich der WEA-Anlagenfläche geht bis 60.000.000 kWh/ha/Jahr. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 3: Stromerträge je Hektar aus PV-Anlagen sowie Windenergieanlangen.

Wie wichtig die Bezugsgröße der Fläche ist, wird beim Vergleich der flächenbezogenen Stromerträge von Windkraft und PV deutlich (siehe Abb. 3). Dies gilt neben der WEA auch für die beiden Agri-PV-Konzepte. Insbesondere das hoch aufgeständerte horizontale Konzept weist einen geringen Flächenbedarf auf und hat somit hohe Flächenenergieerträge, da weiterhin der Großteil der Fläche für die landwirtschaftliche Produktion verwendet werden kann. In Bezug auf die Anlagen- bzw. Windbedarfsfläche liefern die PV-FFA den höchsten Stromertrag. In Bezug auf die landwirtschaftliche Verlustfläche ist der Stromertrag der WEA im Durchschnitt jedoch 26-mal höher als von PV-FFA.



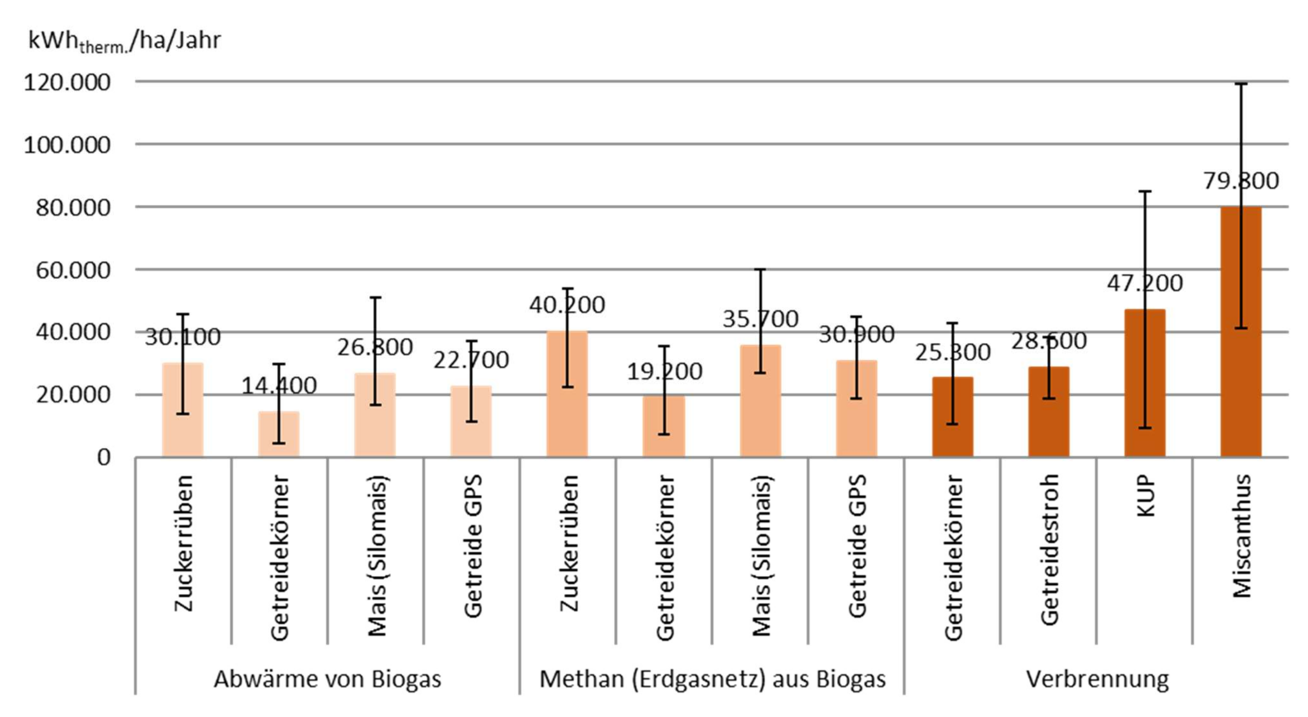
Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. PV-FFA = PV-Freiflächenanlagen, WEA = Windenergieanlagen; die Anlagenfläche entspricht hier der landwirtschaftlichen Verlustfläche; Faktor 28 besagt, dass mit PV-FFA (inkl. Speicherverlusten) auf der Fläche 28-mal mehr Strom erzeugt werden kann, als mit Biogas (inkl. Stromproduktion der Wärme mit OCR).
Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 5: Vergleich der Stromerträge je Hektar landwirtschaftliche Verlustfläche zwischen Biogas, PV-FFA sowie WEA.

Die Abb. 5 zeigt den Vergleich der Stromerträge je Hektar bei der Biogasverstromung sowie bei der PV-FFA und der WEA inklusive Speicherverlusten. Aufgrund der großen Unterschiede sind die Y-Achsen jeweils unterschiedlich skaliert. Um die Abwärme der Biogasanlagen zu berücksichtigen, wurde angenommen, dass die Wärme mit einem OCR-Verfahren ebenfalls verstromt wird. Für PV-FFA und WEA wurden Batteriespeicherverluste zur Lastenglättung berücksichtigt. Auch wenn diese Effekte berücksichtigt werden, bleibt das Ergebnis sehr eindeutig. Mit PV-FFA können je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche etwa 28-mal mehr Strom erzeugt werden als bei der Verstromung von Biogas aus Mais. WEA produzieren selbst unter Berücksichtigung von Speicherverlusten nochmal 26-mal mehr Strom je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche als PV-FFA. Im Vergleich zur Biogasverstromung ist der Stromertrag sogar 720-mal höher.
Bei einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 3.100 kWh/Haushalt/Jahr können je Hektar Biogasmais im Mittel sieben Haushalte pro Jahr versorgt werden. Bei PV-Freiflächenanlagen steigt die Anzahl der zu versorgenden Haushalte auf 230 und bei Windenergieanlagen auf knapp 6.000 (Statistisches Bundesamt, 2021b).

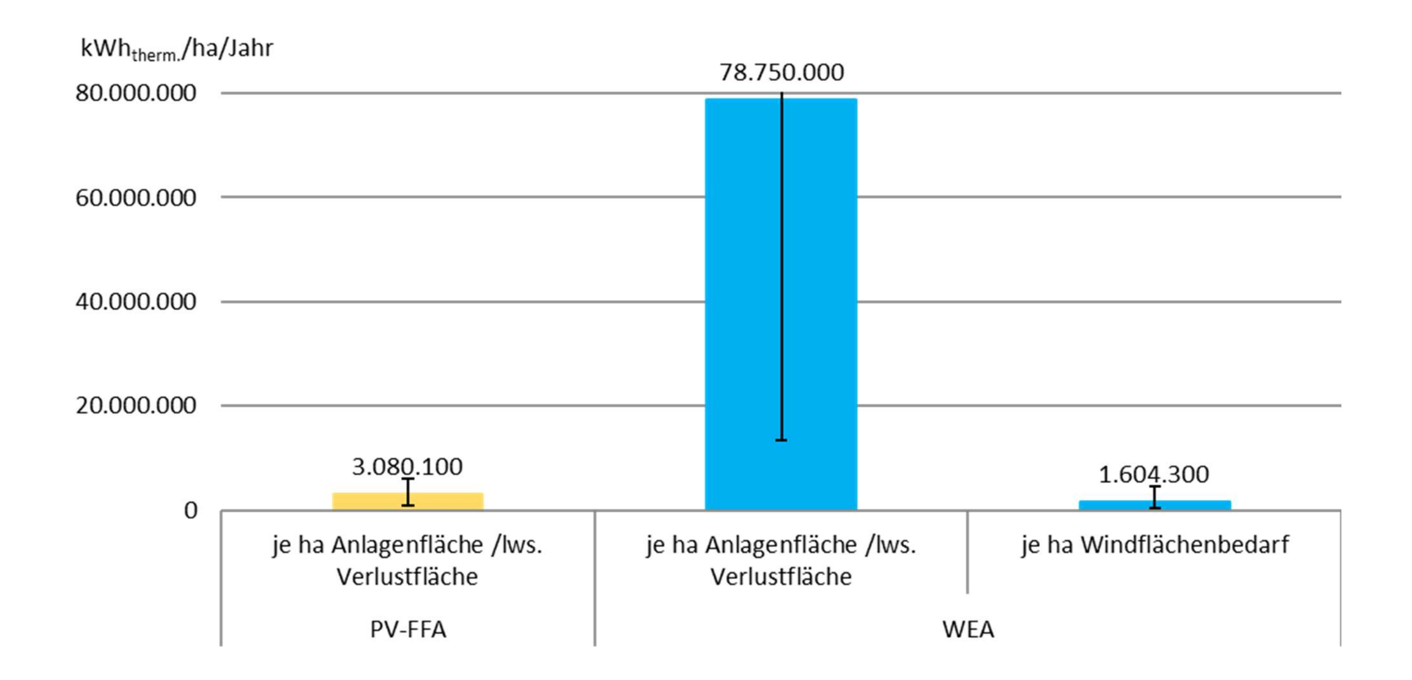
3.2 Flächenbezogene Wärmeerträge

In Bezug auf die Wärmebereitstellung liefert die Verbrennung der Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) und Miscanthus mit mehr als 45 MWh/ha/Jahr den mit Abstand höchsten Wärmeertrag unter den Bioenergielinien (siehe Abbildung 6). Wird bei Getreide sowohl das Korn als auch das Stroh geerntet und verbrannt, ist damit in Summe eine ähnlich hohe Wärmeproduktion möglich. Die Aufbereitung des Biogases zu Methan und Nutzung in Gas-Brennwertthermen ermöglicht mit 30 bis 40 MWh/ha/Jahr einen höheren Wärmeertrag als bei der Nutzung der Abwärme von BHKW's (20 bis 30 MWh/ha/Jahr).



Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. Von Getreide werden Körner und Stroh separat betrachtet. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 6: Wärmeerträge je landwirtschaftlicher Fläche (Hektar) mit biogenen erneuerbaren Energien.

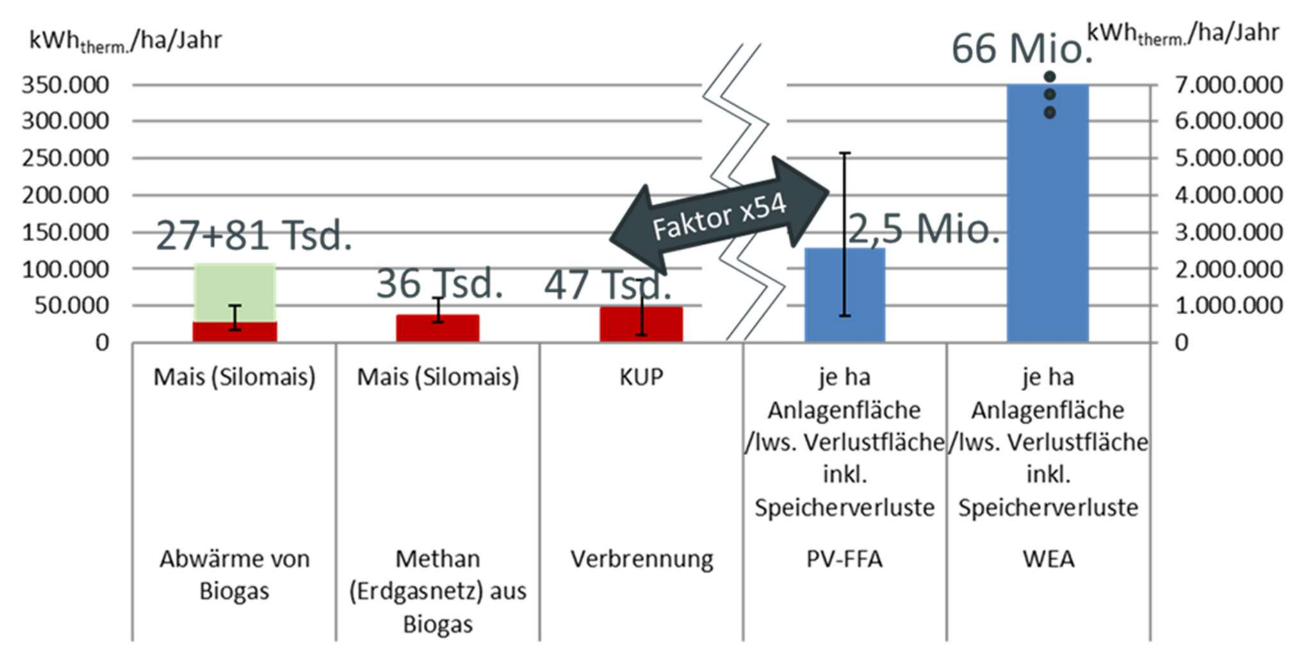


Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. PV-FFA = PV-Freiflächenanlagen, WEA = Windenergieanlagen. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 7: Flächenbezogene Wärmeerträge von technischen erneuerbaren Energien.

In Abbildung 7 sind die Wärmeerträge je Hektar von PV-FFA und WEA dargestellt. Die Verwendung des Stroms in Wärmepumpen führt zu einer weiteren Steigerung des Energieertrages, da im Durchschnitt 3,6 $kWh_{therm.}$ je $kwh_{el.}$ erzeugt werden können. Beim Vergleich der Wärmeerträge aus PV und Wind mit der biogenen Wärmebereitstellung wird deutlich, dass Wind- und PV-Strom deutlich mehr Wärme je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche liefern (vgl. Abbildung 8). Mit PV-FFA kann 54-mal mehr Wärme je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche erzeugt werden als mit Holzhackschnitzeln einer KUP.

Im Vergleich zur Restwärme aus Biogasanlagen ist der Wärmeertrag von PV-FFA 96-mal höher. WEA ermöglichen im Vergleich zu PV-FFA weitere 26-mal höhere Wärmeerträge je Hektar. Selbst wenn der in Biogasanlagen anfallende Strom zusätzlich in Wärmepumpen zu Wärme umgewandelt wird, ist der insgesamt zu erzielende Wärmeertrag 24-mal geringer als in PV-FFA.



Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. PV-FFA = PV-Freiflächenanlagen, WEA = Windenergieanlagen. Faktor 54 besagt, dass die Wärmeproduktion mit PV-FFA (inkl. Speicherverlusten) 54-mal mehr Wärme auf der Fläche produziert als mit der Verbrennung von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen (KUP). Bei Biogas kann eine Gutschrift erfolgen, wobei der produzierte Strom in Wärmepumpen thermisch genutzt wird. Quelle: Eigene Berechnungen

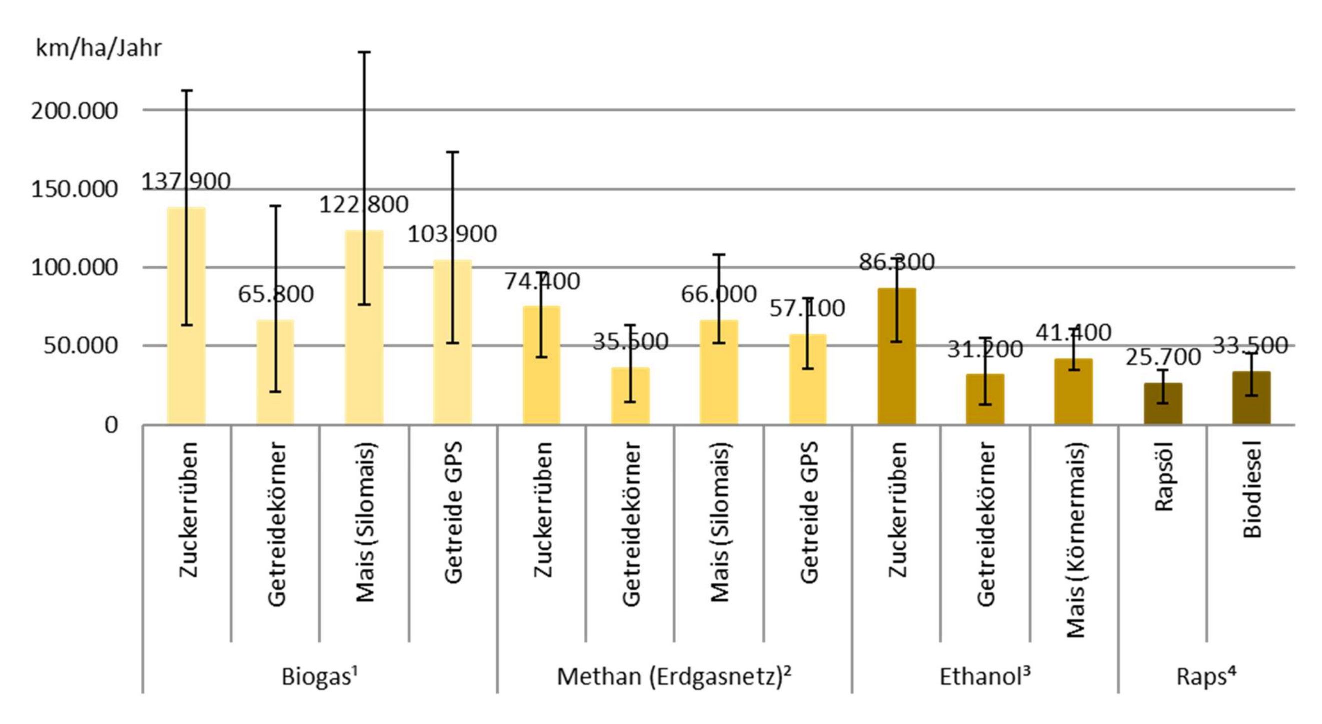
Abb. 8: Vergleich der Wärmeerträge je Hektar von verschiedenen Bioenergielinien sowie PV-FFA und Windenergieanlagen.

Werden die Wärmeerträge je Hektar auf die zu versorgenden Haushalte umgelegt, können bei einem durchschnittlichen Wärmebedarf je Haushalt von 15.200 kWh/Jahr mit Biogas lediglich etwa zwei Haushalte versorgt werden (Statistisches Bundesamt, 2021a). Mit Wärme aus Kurzumtriebsplantagen kann dieser Wert auf drei Haushalte erhöht werden. Wird der Strom aus einem Hektar PV-FFA in Wärmepumpen zu Wärme umgewandelt, können hingegen etwa 170 Haushalte versorgt werden. Bei WEA steigt dieser Wert auf 4.300 Haushalte je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche.

3.3 Flächenbezogene Fahrleistung

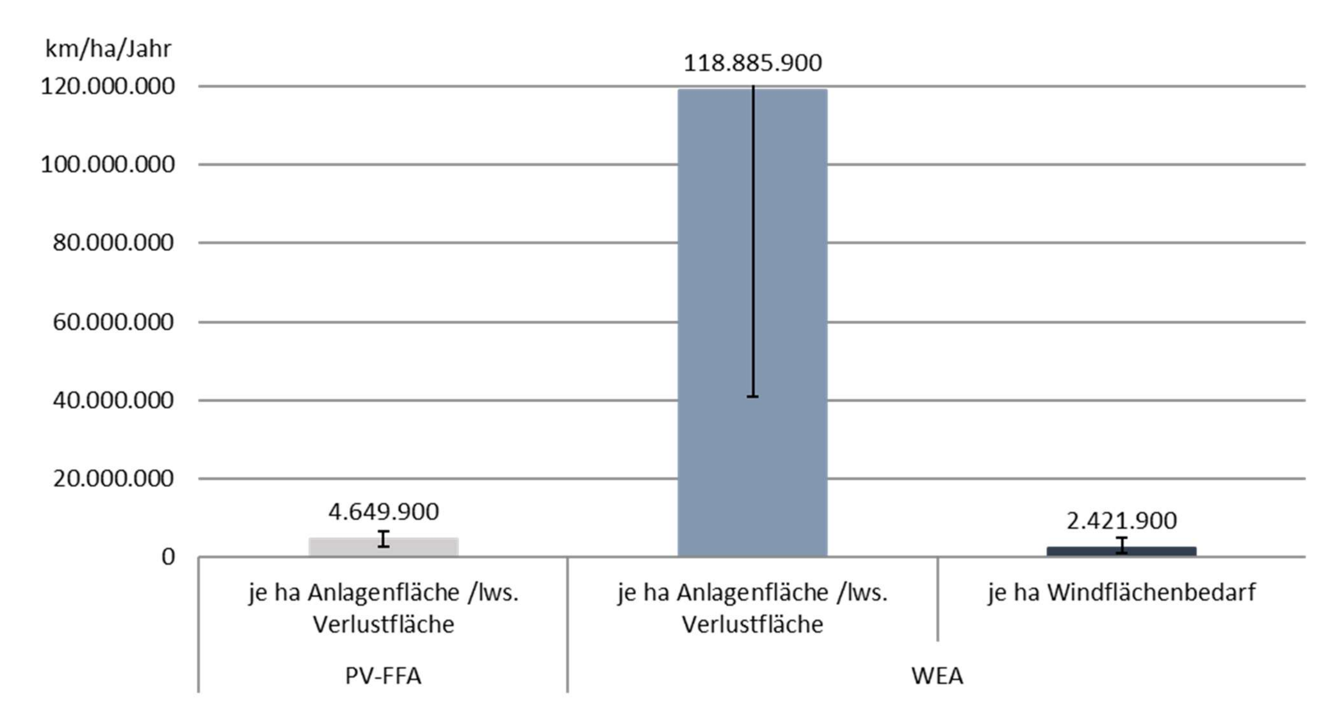
Werden die betrachteten Bioenergielinien hinsichtlich der erzielbaren Fahrleistung miteinander verglichen (Abb. 9) zeigt sich, dass die Nutzung von Biogasstrom anhängig vom Substrat, im Elektroauto mit 65 bis 140 Tsd. Kilometer je Hektar die höchste Fahrleistung ermöglicht. Wird das Biogas aus Silomais zu Methan für ein Erdgasauto aufbereitet, halbiert sich im Vergleich zur Verstromung die zu realisierende jährliche Fahrleistung auf 66 Tsd. Kilometer je Hektar. Auch aus Zuckerrüben

gewonnenes Ethanol ermöglicht mit Fahrleistungen von 86 Tsd. Kilometer je Hektar eine vergleichsweise hohe Distanz. Am geringsten ist die zu realisierende Fahrleistung mit den bisher dominierenden Biokraftstoffen Ethanol aus Getreide und Biodiesel aus Raps. Hier können lediglich zwischen 25 und 40 Tsd. Kilometer je Hektar realisiert werden. Zuckerrüben ermöglichen sowohl bei der Biogasverstromung, Methan Nutzung oder Ethanolherstellung die größten Fahrleistungen der verschiedenen Kulturen.



Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. [1]Biogas wird verstromt und im E-Auto genutzt. [2]Methan wird im Erdgasauto verwendet. [3]Ethanol im Auto mit Ottomotor und [4]Raps im Auto mit Dieselmotor. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 9: Flächenbezogene Fahrleistung je Hektar verschiedener Bioenergielinien.

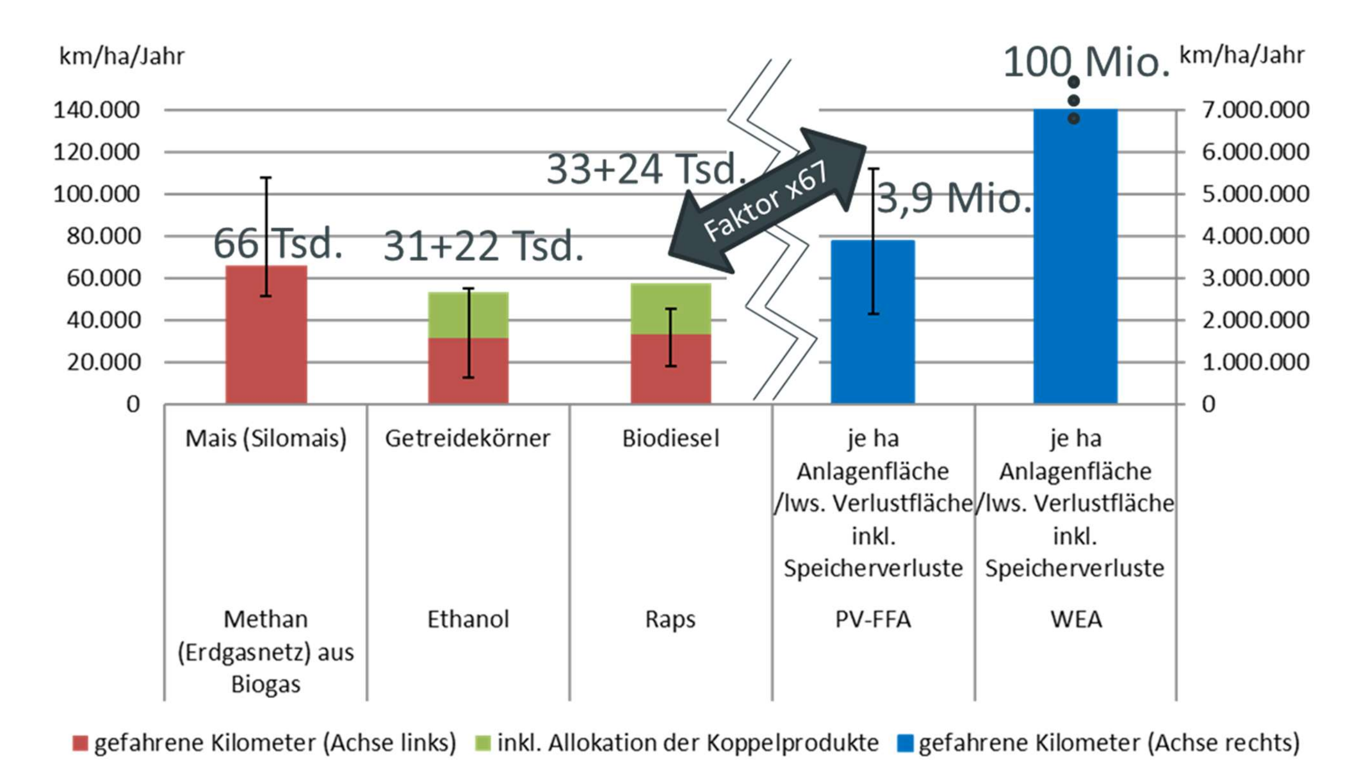


Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. PV-FFA = PV-Freiflächenanlagen, WEA = Windenergieanlagen. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 10: Flächenbezogene Fahrleistung von PV-FFA und WEA.

Die zu erzielende Fahrleistung mit Wind- und PV-Strom von einem Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche wird über die Nutzung eines Elektroautos dargestellt. Mit Strom aus PV-FFA inkl. Speicherverlusten ist es möglich, 3,9 Millionen Kilometer pro Hektar und Jahr zu fahren. Mit Strom aus WEA sind sogar 100 Millionen Kilometer möglich. Unter sehr guten Bedingungen kann die mögliche Kilometerleistung je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche sogar auf maximal 274 Millionen Kilometer pro Jahr ansteigen.

Von den zuvor betrachteten erneuerbaren Energien werden in Abbildung 11 die Energieerzeugungsformen mit den höchsten flächenbezogenen Fahrleistungen verglichen. Dabei werden Gutschriften für die Koppelprodukte sowie Speicherverluste bei WEA und PV-FFA berücksichtigt. Trotz der Gutschriften können mit Methan aus Silomais mehr Kilometer je Hektar und Jahr gefahren werden als mit Ethanol oder Biodiesel aus Raps. Im Vergleich zu den bisher bedeutenden Biokraftstoffen Biodiesel aus Raps oder Ethanol aus Getreidekörnern kann mit Strom PV-FFA in einem Elektroauto 67-mal weiter gefahren werden. Aufgrund des sehr geringen Flächenbedarfs können mit Strom aus WEA je Hektar landwirtschaftlicher Verlustfläche nochmals 26-mal mehr Kilometer gefahren werden als mit Strom aus PV-FFA.



Anmerkung: Die schwarzen Balken geben den möglichen Schwankungsbereich an. PV-FFA = PV-Freiflächenanlagen, WEA = Windenergieanlagen. Faktor 67: mit PV-FFA kann 67-mal weiter gefahren werden als mit Rapsöl inkl. der Allokation der Koppelprodukte. Es wurden über das Allokationsverfahren nach Heizwert (nach EU-Richtlinie 2009/28/EG) bei Raps (RME) die Koppelprodukte Rapsschrot und Glycerin und bei Ethanol aus Getreidekörnern das Koppelprodukt DDGS berücksichtigt. Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 11: Vergleich der Fahrleistung je Hektar von Biokraftstoffe und Strom aus PV-FFA sowie Windenergieanlagen.

4 Diskussion und Fazit

Aufgrund der witterungsbedingten Fluktuation der Energieerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik wird für ein funktionierendes Energiesystem ein Mix verschiedener Technologien benötigt. Aus dem dargestellten Vergleich der Flächenproduktivität lassen sich jedoch wichtige Erkenntnisse über die Potenziale und die Vorteilhaftigkeit der einzelnen Technologien gewinnen.

Aufgrund der knappen Fläche in Deutschland erscheint ein Umbau von weniger Biogas und Biokraftstoffen hin zu mehr Strom aus WEA und PV-FFA sinnvoll. Grundsätzlich können Biogasanlagen flexibilisiert werden und darüber einen Beitrag leisten, um Schwankungen im Stromnetz auszugleichen. Werden aber sowohl WEA als auch PV-FFA im System betrachtet, findet ein gewisser Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung über das Jahr hinweg statt. Im Winter weht tendenziell mehr Wind und im Sommer ist mehr Sonnenenergie vorhanden (Liedler, 2014). Analog zu den großen Gasspeichern, welche für flexible Biogasanlagen benötigt werden, können langfristig große

Batteriespeicher die täglichen Schwankungen von Wind- und PV-Strom ausgleichen. (Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie, 2021).

Bei Biogasanlagen ist zudem zu berücksichtigen, dass die Wärmeerzeugung in der Regel direkt mit der Stromproduktion zusammenhängt, die Nachfrage nach Wärme bei den Verbrauchern aber vor allem im Winter vorhanden ist. Daran wird deutlich, dass der Zeitpunkt der Energieerzeugung sehr wichtig für das System ist, aber keinen Einfluss auf den hier dargestellten Vergleich hat.

Wie einleitend dargestellt (siehe Abb. 1), benötigen die weniger flächeneffizienten biogenen erneuerbaren Energien aktuell einen deutlich größeren Anteil an landwirtschaftlicher Fläche als PV-FFA und WEA. Insbesondere die Verwendung von Raps für die Rapsöl-/Biodieselproduktion hat im Vergleich zu anderen Technologien sehr geringe Flächenenergieerträge. In der Folge könnte künftig beim vermehrten Einsatz von PV-FFA und WEA der gleiche Energieertrag mit einem deutlich geringeren Flächenbedarf erreicht werden.

Der Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen für die Energieerzeugung lässt sich weiter senken, wenn PV-Anlagen vorwiegend auf Dächern und anderen versiegelten Flächen errichtet werden. Allerdings dürften sich hier Zielkonflikte hinsichtlich der Kosten sowie der Umsetzungsgeschwindigkeit ergeben. Wie die Ergebnisse der Analyse zeigen, ist es möglich, mit flächensparenden PV-Konzepten wie der Agri-PV den Verlust an landwirtschaftlicher Fläche zu reduzieren. Erste Analysen zeigen jedoch, dass diese Konzepte teilweise zu deutlich höheren Kosten führen (Böhm, 2022). Sollte dies der Fall sein, sind derartige Ansätze kritisch zu hinterfragen, insbesondere, weil der insgesamt benötigte Flächenbedarf deutlich unterhalb der derzeitigen Flächenbeanspruchung für Bioenergie liegen dürfte (Böhm und Tietz, 2022).

Die Wirtschaftlichkeit von aktuellen Anlagen, wird beispielhaft von Kost et al. (2021) anhand der Stromgestehungskosten dargestellt. Demnach liegen die Stromgestehungskosten für WEA zwischen 3,94 und 8,29 Eurocent/kWh und bei PV-Freiflächenanlagen zwischen 3,12 und 5,7 Eurocent/kWh. Wird die PV-Stromerzeugung mit einem Speicher kombiniert, steigen die Kosten auf 5,24 bis 9,92 Eurocent/kWh. Die Stromgestehungskosten von Biogas liegen mit 8,45 bis 17,26 Eurocent/kWh zum Teil deutlich darüber. Auch vor diesem Hintergrund ist eine Weiterentwicklung der erneuerbaren Energieerzeugung mit entsprechenden Konzepten auf landwirtschaftlichen Flächen ratsam.

Der jeweils in den Abbildungen mit dargestellte Schwankungsbereich der Ergebnisse ist kritisch zu hinterfragen, da sich die Wirtschaftlichkeit der Niedrigertragsszenarien vermutlich so ungünstig darstellt, dass die Anlagen nicht realisiert werden.

Für ein vollständiges Bild hinsichtlich der Effizienz verschiedener erneuerbarer Energien sollten in weiteren Arbeiten auch die Kosten, CO2-Vermeidungsleistung und CO2-Vermeidungskosten miteinander verglichen werden.

Zu beachten ist, dass nur teilweise die für den Naturschutz politisch festgelegten Ausgleichsmaßnahmen auf den PV-Flächen realisiert werden können. Der Ausgleichsflächenbedarf wurde somit bei PV-FFA nur zum Teil und bei WEA gar nicht berücksichtigt. Aufgrund der großen Unterschiede der Flächenenergieerträge haben diese Effekte aber keinen maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse. Wegen des geringen Anteils versiegelter Fläche bei PV-FFA dürfte es zusätzlich möglich sein, Biodiversitätsmaßnahmen auf den Anlagenflächen umzusetzen (Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende, 2022, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V., 2022, Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V., 2022). Hier gilt es künftig zu überlegen, inwiefern politische Ziele und Maßnahmen hinsichtlich der Biodiversität in die künftig zu erwartende Flächenausdehnung für PF-FFA integriert werden können.

Der Vergleich zeigt die Bruttoflächenenergieerträge auf. Der Energiebedarf für die Herstellung der Anlagen und Inputstoffe sowie die ackerbauliche Produktion bei den biogenen erneuerbaren Energien bleibt somit unberücksichtigt. Die Literatur deutet aber darauf hin, dass sich die Kernaussagen dieser Analyse nicht verändern werden, sondern dass die Ergebnisse noch stärker zum Nachteil der biogenen erneuerbaren Energien ausfallen würden. So beträgt bei der Biogasproduktion aus Mais der Anteil der Nettoenergieproduktion an der Bruttoenergieproduktion nur noch 40 % (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007). Bei PV-Anlagen sind es hingegen 94 % der Bruttoenergieerträge, die bei einer Nettobetrachtung übrigbleiben (Fthenakis und Raugei, 2016).

Insgesamt greift es zu kurz, nur die Errichtung von Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Energien zu betrachten, da die zuvor betrachteten Verwertungsrichtungen vor allem im Bereich der Mobilität von einem Umbau der nachgelagerten Infrastruktur abhängen. So wird beispielsweise für die E-Mobilität eine angepasste Infrastruktur benötigt und es müssen geeignete Konzepte für den Schwerlasttransport geschaffen werden.

Da es sich bei der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland um eine knappe Ressource handelt, sollten diese Ergebnisse als Anhaltspunkt für eine effiziente zukünftige Flächennutzung verwendet werden. Der aktuelle Anbau und die Förderung der biogenen erneuerbaren Energien sind als suboptimal einzustufen. Durch die Substitution von Mais für die Biogasanlage und Raps für Biodiesel durch PV-FFA oder WEA kann durch eine angepasste Förderung mehr Fläche für die Nahrungsmittelproduktion verwendet und die Flächeneffizienz gesteigert werden.

Zusammenfassung

Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien – für Strom, Wärme und Verkehr

Die landwirtschaftliche Fläche Deutschlands ist begrenzt. Bei der aktuellen Debatte um die Transformation des Energiesystems in Deutschland stellt sich daher die Frage, wie viel erneuerbare Energie auf der landwirtschaftlichen Fläche erzeugt werden kann. Diese Analyse vergleicht die Flächenenergieerträge verschiedener Arten von biogenen erneuerbaren Energien mit verschiedenen technischen Varianten von Photovoltaik, nämlich PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) und Agriv-Photovoltaikt-Anlagen (Agri-PV-Anlagen) sowie Windenergieanlagen (WEA). Dabei wird die energetische Nutzung als Strom, Wärme und für Mobilität untersucht. Im Ergebnis zeigt sich, dass mit Photovoltaik und Wind um ein Vielfaches mehr Energie je Hektar landwirtschaftlicher Fläche erzeugt werden kann als mit biogenen erneuerbaren Energien, selbst wenn die Koppelprodukte sowie die Stromspeicherung berücksichtigt werden. So ist der Stromertrag je Hektar bei PV-FFA im Mittel 28-mal höher als bei Biogas. Im Wärmesektor kann mit Strom aus PV-FFA und der Umwandlung zu Wärme mithilfe von Wärmepumpen im Mittel sogar 54-mal mehr Wärme auf der Fläche erzeugt werden als mit der Hackschnitzelproduktion aus Kurzumtriebsplantagen. Mit der Nutzung von Raps für Biodiesel, inklusive Gutschrift der Koppelprodukte, ist es möglich, 57 Tausend Kilometer pro Jahr mit einem Mittelklassewagen zu fahren. Mit dem Strom aus einer PV-FFA sind es je Hektar und Jahr hingegen 3,9 Millionen Kilometer. Bezogen auf den Verlust an landwirtschaftlicher Nutzfläche für die Nahrungsmittelproduktion sind WEA noch einmal deutlich flächeneffizienter als PV-FFA. Werden die benannten biogenen erneuerbaren Energien zukünftig durch PV-FFA oder WEA ersetzt, kann der Verlust an landwirtschaftlicher Fläche für die Nahrungsmittelproduktion deutlich reduziert werden. Mit Blick auf eine effiziente Flächennutzung lässt sich eine Änderung der politischen Steuerung zu Gunsten von PV-FFA und vor allem WEA empfehlen.

Schlüsselwörter: erneuerbare Energien, Flächennutzung, Energieerträge, Strom, Wärme, Verkehr

Abstract

Comparison of the area energy yields of different renewable energies – for electricity, heat and transport

Agricultural land is scarce. In the current debate on the transformation of the energy system in Germany, the question therefore arises as to how much renewable energy can be generated on agricultural land. This study compares the area energy yields of different types of biogenic renewable

energy with different technical variants of photovoltaics, namely ground-mounted PV systems (PV-FFA) and agrivoltaic systems, as well as wind turbines (WEA). The energetic use as electricity, heat and for mobility is examined. The results show that photovoltaics and wind can generate many times more energy per hectare of agricultural land than biogenic renewable energies. This does not change when the by-products and electricity storage are considered. For example, the electricity yield per hectare is on average 28 times higher with PV-FFA than with biogas. In the heat sector, an average of 54 times more heat can be generated per hectare with PV-FFA than with woodchip production from short-rotation plantations. With the use of rapeseed for biodiesel, including crediting of the co-products, it is possible to drive 57 thousand kilometres per year with a medium-sized car. With the electricity from a PV-FFA, on the other hand, it is 3.9 million kilometres per hectare and year. In terms of the loss of agricultural land for food production, wind turbines are once again significantly more land-efficient than PV-FFAs. If the aforementioned biogenic renewable energies are replaced by PV-FFA or wind turbines in the future, the loss of agricultural land for food production can be significantly reduced. With a view to efficient land use, a change in political control in favour of PV-FFA and especially wind turbines can be recommended.

Keywords: renewable energies, land use, energy yields, electricity, heat, transport

Literatur

1. ABO WIND, 2021. *Infos für Flächenbesitzer* [online]. *Ein Windpark auf Ihrem Land* [Zugriff am: 19. Mai 2021]. Verfügbar unter: https://www.abo-wind.com/de/leistungen/windkraft/infos-fuer-flaechenbesitzer.html

2. AMELUNG, C., S. WEIHE, G. FREIHERR VON BERLICHINGEN, B. EBELING und M. VAGT, 2014. *Planung von Windenergieanlagen. Worauf Land- und Forstwirte auchten sollten* [online]. Verfügbar unter: https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_395.pdf

3. BARTH, S., 2022. *Experten Feedback Forschungsverbund Windenergie Annahmen Windnergie.* Email.

4. BAUM, S., U. BAIER, J. JUDEX und S. BIOLLAZ, 2008. *Methanverluste bei der Biogasaufbereitung. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE)* [online] [Zugriff am: 6. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.infothek-biomasse.ch/images/115_2008_BFE_Methanverluste_bei_der_Biogasaufbereitung.pdf

5. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, LANDESENTWICKLUNG UND ENERGIE, 2021. *Energie-Atlas Bayern - Wind - Daten und Fakten* [online] [Zugriff am: 22. Januar 2021]. Verfügbar unter: https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind/daten.html

6. BELAU, T., Hg., 2012. *Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus.* 2. Aufl. Darmstadt: KTBL. KTBL-Datensammlung mit Internetangebot. ISBN 9783941583658.

7. BÖHM, J. und A. TIETZ, 2022. *Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen* [online]. Thünen Working Paper 204. Verfügbar unter: DOI:10.3220/WP1669630417000

8. BÖHM, J., 2022. Die Konflikte entschärfen. *DLG-Mitteilung*, **4**, 14-17. DLG-Mitteilung.

9. BÖHM, J., T. DE WITTE und C. MICHAUD, 2022. Land use Prior to Installation of Ground-mounted Photovoltaic in Germany—GIS-analysis Based on MaStR and Basis-DLM [online]. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, **46**(2), 147-156. ISSN 0343-5377. Verfügbar unter: doi:10.1007/s12398-022-00325-4

10. BÖHM, J., T. DE WITTE und E. PLAAS, 2022. PV-Freiflächenanlagen: Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit [online]. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge. Verfügbar unter: doi:10.12767/BUEL.V100I2.421

11. BRANKATSCHK, G. und M. FINKBEINER, 2014. Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments [online]. *Journal of Cleaner Production*, **73**, 72-79. ISSN 09596526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2014.02.005

12. BRAUNE, M., E. GRASEMANN, A. GRÖNGRÖFT, M. KLEMM, K. OEHMICHEN und K. ZECH, Hg., 11. Mai 2016. *Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland - Stand der Technik und Optimierungsansätze* [online]. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. DBFZ-Report. Nr. 22. ISBN 9783981770780 [Zugriff am: 15. August 2022]. Verfügbar unter: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_22.pdf

13. BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND E. V., 2022. *Naturverträgliche Freiflächen-Solaranlagen für Strom und Wärme. BUND-Position 72* [online] [Zugriff am: 23. Juni 2022]. Verfügbar unter: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/position_solaranlagen_freiflaechen.pdf

14. BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE, 2020. *Merkblatt zur Ermittlung des Gesamtenergieverbrauchs. Informationen für zum Energieaudit verpflichtete Unternehmen unterhalb/oberhalb der Bagatellschwelle und für Energieauditoren* [online] [Zugriff am: 4. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_ermittlung_gesamtenergieverbrauch.pdf?__blob=publicationFile&v=6

15. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, 2020a. *Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2019. Reihe: Daten-Analysen* [online] [Zugriff am: 29. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ernte-und-qualitaet/archiv-ernte-und-qualitaet-bee

16. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, 2020b. *Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Kulturarten* [online] [Zugriff am: 22. Oktober 2020]. Verfügbar unter: https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ernte-und-qualitaet/bodennutzung/

17. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2020. *Das Erneuerbare-Energien-Gesetz* [online] [Zugriff am: 11. August 2020]. Verfügbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?cms_docId=73930017

18. BUNDESNETZAGENTUR, 2022. *Marktstammdatenregister* [online]. *Stand 11.08.2022.* 11. August 2022 [Zugriff am: 11. August 2022]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/Marktstammdatenregister/MaStR_node.html

19. BUNDESVERBAND BODEN, 2021. *Boden und Windenergie* [online] [Zugriff am: 19. April 2021]. Verfügbar unter: https://www.bodenwelten.de/content/boden-und-windenergie

20. BUNDESVERBAND NEUE ENERGIEWIRTSCHAFT E.V., 2022. *Gute Planung von PV-Freiflandanlagen. Wie sich Belange der Energiewende, des Umwelt- und Naturschutzes und der Landwirtschaft vereinen lassen* [online] [Zugriff am: 12. Oktober 2022]. Verfügbar unter: https://www.bne-online.de/de/verband/gute-planung-pv/

21. BUNDESVERBAND WINDENERGIE, 2015. *A bis Z - Fakten zur Windenergie. Von A wie Arbeitsplätze bis Z wie Ziele der Energieversorgung* [online] [Zugriff am: 19. Mai 2021]. Verfügbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/01-windkraft-vor-ort/bwe_abisz_3-2015_72dpi_final.pdf

22. DEUTSCHER BUNDESTAG, 2019. *Sachstand Großbatteriespeicher. Einzelfragen zur Lithium-Ionen-Batterietechnologie* [online] [Zugriff am: 5. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.bundestag.de/resource/blob/627424/74e15e4e6f393a030176b8cb29effc24/WD-8-002-19-pdf-data.pdf

23. DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM, 2022. *Erträge im zeitlichen Verlauf 2010 bis 2018* [online] [Zugriff am: 29. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.dbfz.de/projektseiten/biooekonomieatlas/themenbereiche/biomassebasis/erntemengen-agrar

24. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2021. *Din Spec 91434. Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung* [online] [Zugriff am: 20. April 2021]. Verfügbar unter: https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91434/337886742

25. DRESSLER, D., K. ENGELMANN, M. SERDJUK und E. REMMELE, 2016. *Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern. Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkung nach der ExpRessBio-Methode* [online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biokraftstoffe/dateien/tfz_bericht_50_rapsoelkraftstoffproduktion_in_bayern.pdf

26. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2013. *Strohheizungsanlage Gülzow. Demonstration einer Strohheizung mit Nahwärmenetz* [online] [Zugriff am: 12. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/brosch_re_strohheizanlage_web.pdf

27. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2020. *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2021* [online] [Zugriff am: 8. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_geaendert.pdf

28. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2022a. *Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Abschlussbericht zum Projekt „NRstat“* [online] [Zugriff am: 12. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf

29. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2022b. *Biokraftstoff-Quotengesetz Gesetze und Verordnungen* [online]. *Biokraftstoffquotengesetz (BioKraftQuG)* [Zugriff am: 12. September 2022]. Verfügbar unter: https://bioenergie.fnr.de/klimaschutz/gesetze-verordnungen-richtlinien/gesetzeslage/biokraftstoff-quotengesetz

30. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2022c. *Faustzahlen - Biogas* [online] [Zugriff am: 5. April 2022]. Verfügbar unter: https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen

31. FEHRENBACH, H. und S. BÜRCK, 2022. *CO_2-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland* [online] [Zugriff am: 16. August 2022]. Verfügbar unter: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/CO2_Opportunit%C3%A4tskosten_Biokraftstoffe_1602022__002_.pdf

32. FEUERBACHER, A., M. LAUB, P. HÖGY, C. LIPPERT, L. PATACZEK, S. SCHINDELE, C. WIECK und S. ZIKELI, 2021. An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics [online]. *Agricultural Systems*, **192**, 103193. ISSN 0308521X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.agsy.2021.103193

33. FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE, 2022. *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland | Stand April 2022* [online] [Zugriff am: 12. Mai 2022]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html

34. FTHENAKIS, V. und M. RAUGEI, 2016. Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems. In: N. PEARSALL, Hg. *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems. Modelling, Measurement and Assessment.* Kent: Elsevier Science, S. 209-232. ISBN 9781782423362.

35. GÜNTHER, D., J. WAPLER, R. LANGNER, S. HELMLING, M. MIARA, D. FISCHER, D. ZIMMERMANN, T. WOLF und B. WILLE-HAUSMANN, 2020. *WPsmart im Bestand. Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid)* [online] [Zugriff am: 12. September 2022]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wpsmart-im-bestand.html

36. HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ENERGIE, VERKEHR UND LANDESENTWICKLUNG, 2016. *Faktenpapier Windenergie in Hessen: Natur- und Umweltschutz. Bürgerforum Energieland Hessen* [online] [Zugriff am: 19. Mai 2021]. Verfügbar unter: https://www.energieland.hessen.de/aktion/zukunftswerkstatt/fulda_darmstadt/Faktenpapier_Natur_und_Umweltschutz.pdf

37. INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG, 2019. *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial* [online] [Zugriff am: 4. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

38. KEA KLIMASCHUTZ- UND ENERGIEAGENTUR BADEN-WÜRTTEMBERG, 2022. *Technikkatalog zur kommunalen Wärmeplanung* [online] [Zugriff am: 13. September 2022]. Verfügbar unter: https://www.kea-bw.de/waermewende/wissensportal/kommunale-waermeplanung/technikkatalog

39. KOMPETENZZENTRUM NATURSCHUTZ UND ENERGIEWENDE, 2022. *Wie Sie den Artenschutz in Solarparks optimieren. Hinweise zum Vorgehen für kommunale Akteure* [online] [Zugriff am: 23. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE_Wie_Sie_den-Artenschutz_in_Solarparks_optimieren.pdf

40. KOST, C., S. SHAMMUGAM, V. FLURI, D. PEPER, A.D. MEMAR und S. THOMAS, 2021. *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Juni 2021* [online]. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) [Zugriff am: 1. Juli 2021]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html

41. KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT, Hg., 2005. *Faustzahlen für die Landwirtschaft.* 13., [völlig neu bearb.] Aufl. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.(KTBL). ISBN 3784321941.

42. LAUB, M., L. PATACZEK, A. FEUERBACHER, S. ZIKELI und P. HÖGY, 2021. Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems. A meta-analysis [online]. Verfügbar unter: doi:10.31220/agriRxiv.2021.00099

43. LIEDLER, J., 2014. *Untersuchung der Gleichzeitigkeit von Wind- und Photovoltaikeinspeisungen in Energieversorgungsnetzen*.

44. MAJER, S. und K. OEHMICHEN, 2010. *Mögliche Ansätze zur Optimierung der THG-Bilanz von Biodiesel aus Raps* [online]. Verfügbar unter: https://www.ufop.de/files/5213/3907/5358/Optimierung_der_THG-Bilanz_von_RME.pdf

45. MAJER, S., A. GRÖNGRÖFT, C. DRACHE, M. BRAUNE, K. MEISEL, F. MÜLLER-LANGER, K. NEUMANN und K. OEHMICHEN, 2015. *Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Biodiesel. Handreichung* [online] [Zugriff am: 22. August 2022]. Verfügbar unter: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Broschueren/Handreichung_Biodiesel.pdf

46. MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG, 2018. *Hinweise zum Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen* [online] [Zugriff am: 7. August 2020]. Verfügbar unter: https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Sonnenenergie/Hinweise-zum-Ausbau-von-Photovoltaik-Freiflaechenanlagen.pdf

47. NEDDERMANN, B. und E. MÜLLER, 2015. *Rotorblattspitze innerhalb oder außerhalb der Konzentrationszone:. Welchen Einfl uss hat dies auf den Flächenbedarf einer Windenergieanlage?* [online]. Verfügbar unter: https://www.klimaschutz-hannover.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/DEWI_KSA_Vergleich_Fl%C3%A4chenbedarf_WEA_Rotorblatt_innen_au%C3%9Fen_01.pdf

48. NEXT2SUN, 2020. *Beteiligungsangebot von Next2Sun* [online]. *Bifaciale Solarmodule für die Energiewende.* 10. November 2020 [Zugriff am: 12. November 2020]. Verfügbar unter: https://beteiligungsportal.oekostrom-saar.de/Next2Sun-III

49. PROGNOS, ÖKO-INSTITUT und WUPPERTAL-INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT UND ENERGIE, 2021. *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann* [online]. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf

50. QUENTIN, J. und F. TUCCI, 2021. *Entwicklung der Windenergie im Wald. Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern* [online]. 6. Auflage [Zugriff am: 19. Mai 2021]. Verfügbar unter: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Windenergie_im_Wald/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_6Auflage_2021.pdf

51. REIMANN, T., 2013. *Wie viel Fläche benötigt ein Windrad?* [online]. 26. Januar 2013 [Zugriff am: 19. Mai 2021]. Verfügbar unter: http://www.windkraftscout.de/flaeche-benoetigt-windrad-windenergieanlage/

52. SCHINDELE, S., M. TROMMSDORFF, A. SCHLAAK, T. OBERGFELL, G. BOPP, C. REISE, C. BRAUN, A. WESELEK, A. BAUERLE, P. HÖGY, A. GOETZBERGER und E. WEBER, 2020. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications [online]. *Applied Energy*, **265.** ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2020.114737

53. SEEGER, L., N. MITTELSTÄDT, D. MANSKE und D. THRÄN, 2023. Kritische Flächenfragen – Flächenveränderungen und Flächendruck in Deutschland im Untersuchungszeitraum 2016 – 2020 [online]. *UFZ Discussion Papers.* UFZ Discussion Papers [Zugriff am: 2. März 2023]. Verfügbar unter: doi:10.13140/RG.2.2.13302.47682

54. STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021a. *Energieverbrauch privater Haushalte für Wohnen 2019 weiter gestiegen* [online]. 13. August 2021 [Zugriff am: 4. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/08/PD21_383_85.html

55. STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b. *Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen* [online] [Zugriff am: 4. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html

56. TEßMER, J., 2022. *Experten Feedback DLR Annahmen Windenergie.* mündlich. Braunschweig.

57. TROMMSDORFF, M., 2018. *Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung* [online]. Vortrag. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) [Zugriff am: 18. Januar 2021]. Verfügbar unter: https://www.efzn.de/fileadmin/documents/Nieders%C3%A4chsische_Solarenergietage_2018/NSET_2018_Trommsdorff.pdf

58. V.D.DECKEN, H., 1. März 2023. Experteninterview zum Thema Flächenbedarf Windenergieanlagen. Telefonat.

59. WIETSCHEL, M., C. MOLL, S. OBERLE, B. LUX, S. TIMMERBERG, U. NEULING, M. KALTSCHMITT und N. ASHLEY-BELBIN, 2019. *Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Endbericht* [online] [Zugriff am: 8. April 2022]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf

60. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT AGRARPOLITIK, 2007. *Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung. - Empfehlungen an die Politik -* [online]. Verfügbar unter: https://www.bmel.de/DE/ministerium/organisation/beiraete/nutzung-biomasse-energiegewinnung-vorwort.html

Anschrift des Autors

Jonas Böhm

Thünen-Institut für Betriebswirtschaft

Bundesallee 63

38116 Braunschweig

E-Mail: jonas.boehm@thuenen.de

ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1721-3670

Anhang

Anhang 1:
Biogaserträge und Methanausbeute je nach Kulturen.

	Biogasertrag [m^3/t FM]	Methanausbeute
Silomais	216	52
Zuckerrüben	145	52
Getreide-GPS	206	53
Getreidekörner	616	52

Quelle: (Belau, 2012).

Anhang 2:
Weitere Annahmen Biogas

	Wert	Einheit	Quelle
Dichte Methan	0,72	kg/m^3	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2022c)
Brennwert Biogas	7,5	kWh/m^3	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2020)
Brennwert Methan	9,97	kWh/m^3	Belau (2012)
Umwandlungseffizienz Aufbereitung Methan fürs Erdgasnetz	87/92,5/98*	%	Baum et al. (2008)

Anmerkung: *Min/Mittelwert/Max

Anhang 3:
Ethanol-Erträge je nach Kulturen

	Ethanol-Ertrag [l/t FM]	Berechnet nach
Körnermais	415	Tabelle 2-9 Belau (2012)
Zuckerrüben	107	Tabelle 5-8 Belau (2012)
Getreide	384/400/416*	Tabelle 1-11 Belau (2012)

Anmerkung: *Min/Mittelwert/Max

Anhang 4:
Annahmen Brennstoffe

Kultur	Trockenmassegehalt [%]	Heizwert [kWh/t TM]	Berechnet nach
Kurzumtriebsplantagen (KUP) mit Weiden oder Pappeln	65	5097	Tabelle 10-5 Belau (2012)
Miscanthus	80	4889	Tabelle 9-4 Belau (2012)
Getreidekörner	86	694/4722/4750*	Tabelle 1-16 Belau (2012)
Getreidestroh	86	750/4792/4833*	Tabelle 1-18 Belau (2012)

Anmerkung: *Min/Mittelwert/Max

Quelle: Belau (2012)

Anhang 5:
Annahmen für die energetische Nutzung von Raps.

	Annahmen	Quelle
RME Herstellung – Umwandlungseffizienz	61,9 %	berechnet nach Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik (2007)).
Rapskorn – Energiegehalt	7111 kWh/t TM	berechnet nach Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2005)
Rapskorn – Trockenmassegehalt	91 %	Belau (2012)

Anhang 6:
Formel nur Berechnung des Allokationsfaktors nach Dressler et al. (2016).

$$AF_{HP} = \frac{m_{HP} * Bezugsgröße_{HP}}{(m_{HP} * Bezugsgröße_{HP}) + (m_{NP} * Bezugsgröße_{NP})}$$

AF = Allokationsfaktor

m = Masse

HP = Hauptprodukt

NP = Nebenprodukte

Anhang 7:
Formel zur Berechnung des Energieertrages mit Gutschrift.

$$Eg = \frac{Er}{A}$$

Eg = Energieertrag der Fläche mit Gutschrift [kWh/ha/Jahr]

Er = Energieertrag der Fläche ohne Gutschrift [kWh/ha/Jahr]

A = Allokationsfaktor [%]